中国生态农业学报 2016 年 3 月 第 24 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2016, 24(3): 293−305

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150962

1961—2010 年气候变化对西南冬小麦潜在和雨养产量影响的模拟分析*

戴 彤[1,2] 王 靖[1**] 赫 迪[1] 王 娜[1]

(1. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 2. 天津市静海区气象局 天津 301600)

摘 要 利用农业气象试验站作物资料及土壤资料，评价 APSIM-Wheat 模型在西南地区的适应性，应用该模型分析该地区 1961—2010 年冬小麦潜在和雨养产量的时空变化特征，通过逐步回归分析揭示小麦生长季主要气象因子对潜在产量和雨养产量的影响及相对贡献率。研究结果表明：APSIM 模型对该区 5 个常用小麦品种的模拟效果较好，模拟与实测生育期的均方根误差(RMSE)在 7.0 d 以内，地上部分生物量和产量模拟值与实测值的归一化均方根误差(NRMSE)均低于 25%，模型在西南地区具有较好的适应性。1961—2010 年研究区域 36%的站点冬小麦生长季总辐射显著降低，其中北部、东南部和南部中区最显著；68%的站点生长季≥0 ℃有效积温显著增加，西部增温显著；30%的站点生长季平均气温日较差显著减小，南部中区最显著；全区生长季总降水大面积减少但不显著，减少区主要位于最南端和东南部。模拟的冬小麦潜在产量在 65%的站点呈显著减产趋势，南部中区和北部变化最明显；雨养产量在 25%的站点显著降低，北部地区较明显，全区减产趋势较弱。减产显著的站点中，生长季辐射降低、温度升高、气温日较差减小对潜在产量降低的贡献率分别为 45%、36%和 2%，对雨养产量降低的贡献率分别为 36%、39%和−8%，而降水减少对雨养产量降低的贡献率为 7%。西南冬小麦生长季辐射降低、温度升高及降水减少共同导致了冬小麦潜在和雨养产量的显著下降，而气温日较差的降低对冬小麦潜在和雨养产量的影响分别表现为负作用和正作用，整体上辐射和温度的影响程度最大。

关键词 冬小麦 APSIM 模型 气候变化 气象因子 潜在产量 雨养产量 逐步回归 贡献率
中图分类号: S162.5+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)03-0293-13

Impact simulation of climate change on potential and rainfed yields of winter wheat in Southwest China from 1961 to 2010*

DAI Tong[1,2], WANG Jing[1**], HE Di[1], WANG Na[1]

(1. College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Jinghai Meteorological Bureau, Tianjin 301600, China)

Abstract Using crop and soil data from agro-meteorological observational stations together with meteorological data from meteorological stations, the study evaluated the adaptability of APSIM-Wheat (Agricultural Production Systems sIMulator-Wheat) model in winter wheat planting zones in Southwest China (SWC). Then, the model was used to calculate the potential and rainfed yields of winter wheat from 1961 to 2010 in SWC. The relative contribution rates of the changes in main climatic factors during crop growing season to the changes in simulated potential and rainfed yields of winter wheat were determined with the stepwise regression method. The study results showed that APSIM-Wheat model performed well in simulating phenology, above-ground biomass and yield of five representative winter wheat varieties in SWC. Root Mean Square Error

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB430205)和全国涉农引智平台项目(2015z007)资助
** 通讯作者：王靖，主要研究方向为气候变化影响与适应。E-mail: wangj@cau.edu.cn
戴彤，主要研究方向为气候变化对作物的影响。E-mail: daitongtiger@foxmail.com
收稿日期: 2015−09−03 接受日期: 2015−11−03
* Supported by the National Basic Research and Development Program of China (973 Program) (No. 2013CB430205) and the National Agricultural Introducing Intelligence Platform (No. 2015z007)
** Corresponding author, E-mail: wangj@cau.edu.cn
Received Sep. 3, 2015; accepted Nov. 3, 2015

(RMSE) between simulated and observed wheat phenology were less than 7.0 d for all the varieties. Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) between simulated and observed above-ground biomass and yield were lower than 25% and 21%, respectively, for all the varieties. Total solar radiation during wheat growing season decreased significantly at 36% of the study stations centered in the northern, southeastern and mid-southern SWC. The effective accumulative temperature of not less than 0 ℃ during wheat growing season increased significantly at 68% of the study stations centered in the western SWC, while average diurnal temperature range during wheat growing season decreased significantly at 30% of study stations centered in the mid-southern SWC (P < 0.05). Total precipitation during wheat growing season decreased at most of study stations centered in the southern and southeastern SWC from 1961 to 2010. As a result, simulated potential yield of winter wheat also showed a significant decline at 65% of study stations, especially in the mid-southern and northern SWC. Simulated yield of rainfed wheat showed a significant decline at 25% of study stations, especially in the northern SWC. The contribution rates of the decrease of solar radiation and diurnal temperature range, the increase of temperature during wheat growing season were 45%, 2% and 36%, respectively, to the reduction in simulated potential yield, and 36%, 39% and −8%, respectively, to the reduction in simulated yield of rainfed wheat. The contribution rate of decreasing precipitation during wheat growing season was 7% to the reduction in simulated yield of rainfed wheat. In general, solar radiation and temperature had the most obvious effects on simulated yield variations of winter wheat in SWC from 1961 to 2010. The decrease in solar radiation and precipitation, and the increase in temperature during winter wheat growing season led to a decline in both simulated potential and rainfed yields at most of study stations in SWC, while the decreased diurnal temperature range had both negative and positive effects on potential and rainfed yields, respectively. Quantifying the impacts of light, temperature and precipitation on wheat production using APSIM model provided a sound foundation for taking countermeasures for adapting to climate change and improving wheat yield in Southwest China.

Keywords Winter wheat; APSIM model; Climate change; Climatic factor; Potential yield; Rainfed yield; Stepwise regression; Contribution rate

西南地区是我国重要的粮食产区之一，小麦作为西南地区第三大粮食作物，在满足当地口粮消费需求外，也为酿酒等工业消费提供原料，该区常年小麦种植面积和总产量分别占全国小麦总面积和总产量的 11%和 9%[1]。农业对气候条件的依赖性强，气候变化会显著影响作物生长发育、病虫害发生、作物生产力和资源利用效率等多个方面。因此在气候变暖背景下，量化该区气候要素变化程度及其对冬小麦产量的影响具有重要意义。当前评估气候变化对小麦产量影响的方法主要包括在实验室或田间进行的气候变化模拟试验[2−3]、以气象因子与小麦产量统计回归关系为基础的统计模型[4]，以及作物生产潜力模型[3]和作物生长模型。其中作物生长模型能够动态模拟作物生长发育和产量形成过程，可较准确地表达作物生长与气候因子变化的关系，现阶段已成为农业生产中的高效工具[5]。APSIM 模型自引进我国以来，已经在多个农作物主产区进行了参数调试和验证工作，并已被用于评估气候变化对小麦生产的影响。如在华北平原的研究表明，气候变化对冬小麦产量普遍存在负影响，其中辐射减少和温度升高是导致冬小麦产量下降的主要气象因子，而通过播期调整、品种改良与农田管理措施的改善可减轻或抵消这种不利影响[6−11]；在西北黄土高原，由于温度升高缩短了小麦的生育期同时使麦田的蒸发加大，造成小麦水分亏缺，对春小麦产量产生了不利影响，但可以通过免耕覆盖等措施减轻小麦由于水分亏缺造成的伤害[12−13]。

相对于华北和西北小麦主产区，气候变化对我国西南地区小麦产量影响的研究报道甚少[14−15]，为当地决策者提供的理论支撑较薄弱。因此，本文旨在基于验证后的 APSIM 模型，分析西南地区 1961—2010 年冬小麦潜在和雨养产量的时空分布特征及其受生长季内光、温和降水资源的影响程度，并为评价未来气候变化对冬小麦生产的影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和数据来源

我国西南地区介于 21°08′~34°19′E 和 97°21′~110°11′N，包括四川、云南、贵州和重庆 4 省(市)。全区地势呈北高南低、西高东低趋势，具有盆地、高原、平地、山地和丘陵多种地貌类型，是世界上地形最复杂的区域之一。全区大部处于亚热带，雨量充沛，热量条件较好，而且秦岭、大巴山屏障阻挡寒潮侵袭，冬季温和，生长季长，除少数高山外，稻麦均可两熟，亦可广泛栽种亚热带多年生植物，是我国重要的农林业产区[16−17]。

四川、云南、贵州和重庆 64 个研究站点的 1961—2010 年逐日气象资料来自于中国气象局国家

气象信息中心地面气象观测资料；冬小麦生长发育、产量构成和田间管理资料来源于农业气象试验站，土壤资料参考自中国土种志(第 6 卷)[18]。根据西南地区特点、农业气候特征以及当地冬小麦的播种期和生育期长度，以县级为划分单元将该区冬小麦分为 1 个非种植区和 5 个种植区，冬小麦种植分区情况如图 1 所示。西南地区土壤类型复杂，根据中国土壤分布图将该区土壤划分为 5 种类型(表 1)。

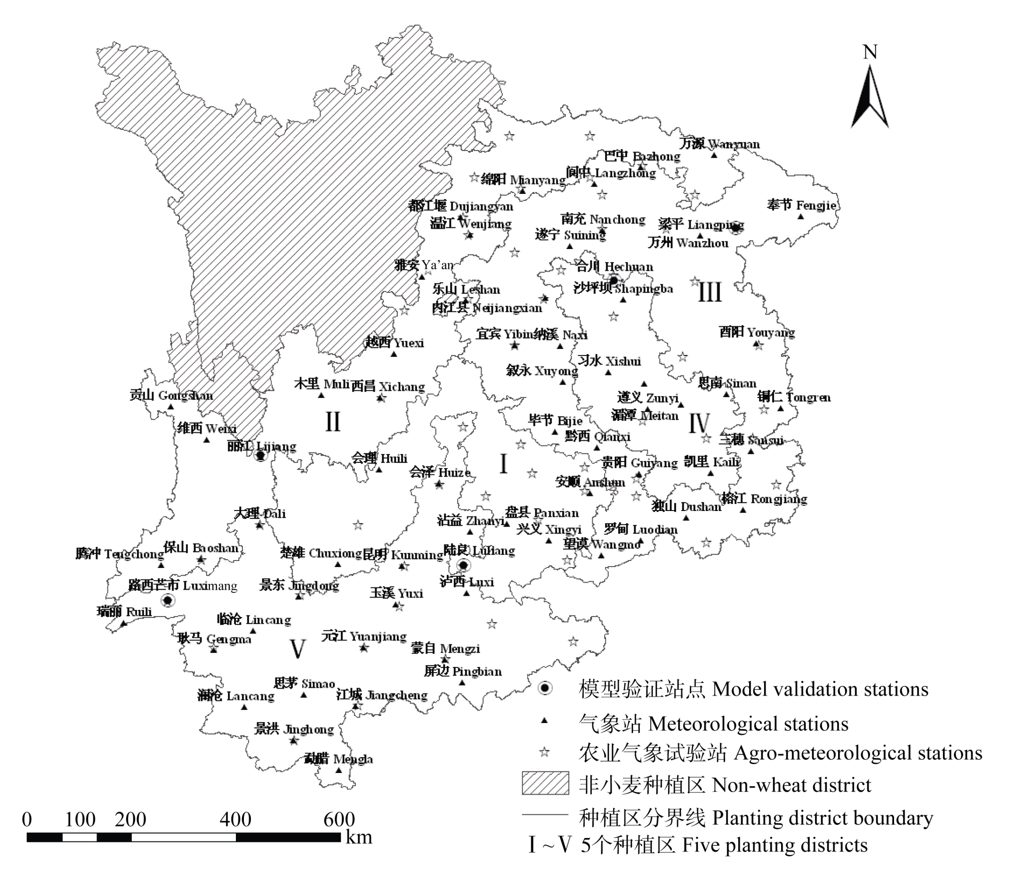


图 1　西南地区冬小麦种植分区和研究站点分布

Fig. 1　Winter wheat planting districts and distribution of the study sites in Southwest China

1.2　APSIM 模型简介

APSIM 模型是由澳大利亚农业生产系统研究组(APSRU)开发的用于模拟农业生产系统生物物理过程的机理模型，其特色在于从农业生产系统角度出发，考虑了轮作、休耕、残茬处理等，目前已广泛用于农作系统管理、气候变化影响评估、气候预报的价值评估以及气候风险管理等方面[19−20]。

APSIM 模型的核心模块包括：作物模块、土壤模块、管理模块。作物模块主要用于模拟作物的生长、发育和产量形成，其参数主要包括作物参数和品种遗传参数。土壤模块用于模拟土壤水分运动、养分运移、土壤侵蚀等过程，土壤水分基础参数包括各层土壤的饱和含水量($mm^3 \cdot mm^{-3}$)、田间持水量($mm^3 \cdot mm^{-3}$)和凋萎系数($mm^3 \cdot mm^{-3}$)等。管理模块主要用于各模块的调用、作物播种期和收获期、施肥和灌溉管理措施的设定、输入和输出变量的设置等。APSIM 为日步长模型，输入的气象数据包括逐日最高气温(℃)、最低气温(℃)、降水量(mm)和总辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)，其中总辐射根据日照数据由 Ångström-Prescott 公式[21−22]估算。模型主要输出量包括作物的关键生育期(出苗期、开花期和成熟期)、地上部分生物量和产量等。

1.3　模型参数调试和验证方法

本研究前期已经对 APSIM-Wheat 模型在重庆地区的适应性进行了评价[23]，本文进一步增加西南地区站点以评价该模型的模拟能力。模型参数调试与验证主要采用均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)、决定系数(R^2)和一致性指标(D 指标)对模拟值与实测值进行对比分析，其中 RMSE 和 NRMSE 取值越小以及 R^2 和 D 指标取值越接近 1 均表明模拟效果越好。模型参数调试阶段利用“试错法”确定典型小麦品种的遗传参数(表 2)；并通过该品种验证年份生育期、地上部分生物量和产量的模拟值与实测值间绝对、相对误差和一致性的比较(表 3)，

评价 APSIM 小麦模型在西南地区的适应性。

1.4 模型情景设计

基于 APSIM 模型模拟西南地区 1961—2010 年冬小麦潜在产量和雨养产量，其中潜在产量为水分充足下由该区光温资源决定的产量；雨养产量为无灌溉条件下由自然光、温、降水资源共同决定的产量。两种情景均设置充分施氮且不考虑病虫害。为了研究单因素气候变化的影响，在模拟期间设定品种不变，选取各种植区小麦实际连续种植年份较长的品种作为该区典型品种，并根据小麦种植区设定播期(表 2)。播种密度为 300 株·m^{-2}，播种深度为 5.0 cm，并依据土壤类型输入土壤水分参数(表 1)。

1.5 气候要素变化对产量的贡献率

气候变化背景下，对小麦生长发育有显著影响的主要气象因子为温度、降水和日照[6-10]。而气温日较差与平均温度可共同反映最高温度与最低温度的变化和影响程度，因此，本文将对辐射、温度、气温日较差和降水这 4 个气象因子对小麦产量的影响进行分析。基于 APSIM 模型模拟的冬小麦潜在和雨养产量变化显著的站点，采用逐步回归方法剔除影响不显著因子，然后通过贡献率表示辐射、温度、气温日较差和降水中影响显著因子对产量的单一影响程度，并通过标准化回归系数对各气象因子的影响进行对比。其中贡献率为 1961—2010 年该因子变化幅度乘以其偏回归系数所占产量总变化幅度的百分比，偏回归系数为多元回归分析的系数，可表示在其他所有自变量不变的情况下，某一个自变量变化引起因变量变化的比率；标准化回归系数是线性回归时对变量做的标准化变化，数值上等于变量减去其均值并除以其标准差的估计，可消除自变量数量级及量纲(单位)不同引起的误差[24]。

由于模型假设品种和管理措施不变，模型模拟的雨养产量近似于仅气象条件下影响的实际产量。因此为验证 APSIM 模型能否抓住气象条件对产量的影响，选取小麦连续种植年份较长的农业气象观测站点(表 8)，运用 5 年滑动平均法[4]拟合趋势产量，从冬小麦实际产量中提取出气象产量，并依据气象产量变化率(气象产量占趋势产量的百分率)划分气候较好(>10%)、正常(–10%~10%)和较差(<–10%)年型，按不同年型进行气象产量变化率与模拟的雨养产量距平变化率(雨养产量与平均产量差占平均产量的百分率)的对比分析。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型参数调试和验证

参数调试过程确定的作物遗传参数如表 2 所示。在模拟的 5 个冬小麦品种中，模拟与实测出苗天数、开花天数及成熟天数的 RMSE 分别在 1.0 d、7.0 d和 5.0 d以内；地上部分生物量和产量模拟值与实测值的 NRMSE 分别低于 25%和 21%(表 3)。验证结果表明 APSIM 模型对冬小麦生育期、生物量和产量的模拟较准确，该模型在西南地区具有较好的适应性。

2.2 冬小麦生长季气候要素变化特征

1961—2010 年西南各冬小麦种植区的生长季气象要素变化特征如表 4 所示。其中冬小麦生长季总辐射在Ⅲ区下降最多，而Ⅴ区有增加趋势；生长季≥0 ℃有效积温在Ⅱ区上升最多，Ⅰ区次之，Ⅲ区上升最少；生长季气温日较差在Ⅰ区减少明显，Ⅲ区变化幅度较弱；生长季总降水在Ⅰ区减少最多，Ⅳ区次之，而Ⅱ区降水呈微增势态。西南全区 75%的研究站点冬小麦生长季总辐射呈减少趋势，其中 48%的站点通过显著性检验(P<0.05)，种植区北部、东南部和南部中区减少较为明显，全区平均变化速率–14.3 MJ·m^{-2}·$10a^{-1}$；95%的站点≥0 ℃有效积温呈升高趋势，其中 72%的站点通过显著性检验(P<0.05)，西部地区增温较明显，全区平均增温速率 40.2 ℃·d·$10a^{-1}$；78%的站点生长季平均气温日较差呈减少趋势，其中 38%的站点通过显著性检验，南部中区变化较明显，全区平均变化速率–0.13 ℃·$10a^{-1}$；69%的站点生长季总降水呈减少趋势，全区绝大部分站点变化不显著，平均变化速率–4.8 mm·$10a^{-1}$，空间上呈西北增多，南部和东南部减少势态分布(图 2)。

2.3 冬小麦潜在和雨养产量变化特征

模拟的西南地区冬小麦潜在和雨养产量多年均值及变化趋势的分区差异如表 5 所示。1961—2010 年Ⅱ区的冬小麦潜在产量最高，Ⅲ区次之，考虑降水因子影响后，Ⅲ区冬小麦雨养产量最高，Ⅱ区次之，而Ⅴ区的小麦潜在和雨养产量均为最低。冬小麦潜在产量和雨养产量分别在Ⅲ区和Ⅳ区降低最明显，而Ⅰ区和Ⅴ区的潜在和雨养产量受气候变化负面影响均较小，且雨养产量呈稍增加趋势。全区范围内，冬小麦潜在产量变化范围 2 386~10 146 kg·hm^{-2}，全区均值 5 697 kg·hm^{-2}；空间上呈西北高、南部和东部低的分布势态；1961—2010 年 86%的站点潜在产量呈下降趋势，其中 76%的站点显著减产(P<0.05)，种植区北部和南部中区最明显，全区产量平均变化速率为–110 kg·hm^{-2}·$10a^{-1}$。冬小麦雨养产量变化范围 2 386~8 774 kg·hm^{-2}，全区均值 4 605 kg·hm^{-2}，

表 1　西南地区主要土壤不同土层物理特征参数

Table 1　Soil physical parameters in different soil layers of main soil types in Southwest China

土壤类型 Soil type	土壤参数 Soil parameter	土层深度 Soil depth (cm)										站点 Station	省(市) Province (City)
		0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100		
紫色土 Purple soil	ll15 (mm^3·mm^{-3})	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.18	0.18	0.18	—	—	温江、绵阳、乐山、宜宾、阆中、遂宁、南充、梁平、内江、沙坪坝、纳溪	四川 Sichuan
	dull (mm^3·mm^{-3})	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32	—	—	Wenjiang, Mianyang, Leshan, Yibin, Langzhong, Suining, Nanchong, Liangping, Neijiang, Shapingba, Naxi	重庆 Chongqing
	sat (mm^3·mm^{-3})	0.44	0.44	0.43	0.43	0.43	0.44	0.44	0.44	—	—		
	bd (g·cm^{-3})	1.49	1.49	1.51	1.51	1.51	1.50	1.50	1.50	—	—		
红壤 Red soil	ll15 (mm^3·mm^{-3})	0.21	0.21	0.23	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	木里、贡山、维西、西昌、会理、会泽、腾冲、保山、大理、楚雄、昆明、沾益、盘县、瑞丽、玉溪、思南、铜仁、三穗、兴义、望谟、罗甸、独山、榕江、丽江	四川 Sichuan
	dull (mm^3·mm^{-3})	0.34	0.34	0.35	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	Muli, Gongshan, Weixi, Xichang, Huili, Huize, Tengchong, Baoshan, Dali, Chuxiong, Kunming, Zhanyi, Panxian, Ruili, Yuxi, Sinan, Tongren, Sansui, Xingyi, Wangmo, Luodian, Dushan, Rongjiang, Lijiang	云南 Yunnan
	sat (mm^3·mm^{-3})	0.47	0.47	0.46	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47		贵州 Guizhou
	bd (g·cm^{-3})	1.40	1.40	1.44	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40		
赤红壤 Lateritic red soil	ll15 (mm^3·mm^{-3})	0.33	0.33	0.37	0.39	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	—	景东、泸西、耿马、临沧、澜沧、景洪、思茅、元江、勐腊、江城、蒙自、屏边	云南 Yunnan
	dull (mm^3·mm^{-3})	0.44	0.44	0.46	0.48	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	—	Jingdong, Luxi, Gengma, Lincang, Lancang, Jinghong, Simao, Yuanjiang, Mengla, Jiangcheng, Mengzi, Pingbian	
	sat (mm^3·mm^{-3})	0.52	0.52	0.54	0.56	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	—		
	bd (g·cm^{-3})	1.27	1.27	1.22	1.17	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	—		
黄壤 Yellow soil	ll15 (mm^3·mm^{-3})	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	—	都江堰、雅安、桐梓、叙永、习水、酉阳、毕节、遵义、湄潭、黔西、安顺、贵阳、凯里	四川 Sichuan
	dull (mm^3·mm^{-3})	0.29	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	—	Dujiangyan, Ya'an, Tongzi, Xuyong, Xishui, Youyang, Bijie, Zunyi, Meitan, Qianxi, Anshun, Guiyang, Kaili	重庆 Chongqing
	sat (mm^3·mm^{-3})	0.49	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.42	0.41	0.41	—		贵州 Guizhou
	bd (g·cm^{-3})	1.35	1.48	1.49	1.49	1.49	1.49	1.53	1.57	1.57	—		
黄棕壤 Yellow-brown soil	ll15 (mm^3·mm^{-3})	0.19	0.19	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	越西、万源、巴中、奉节	四川 Sichuan
	dull (mm^3·mm^{-3})	0.37	0.38	0.39	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	Yuexi, Wanyuan, Bazhong, Fengjie	重庆 Chongqing
	sat (mm^3·mm^{-3})	0.63	0.63	0.63	0.58	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55		
	bd (g·cm^{-3})	0.99	0.99	0.97	1.13	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19		

ll15: 萎蔫系数; dull: 田间持水量; sat: 饱和含水量; bd: 土壤容重。ll15: wilting point; dull: field capacity; sat: saturated water content; bd: bulk density.

表 2 西南地区冬小麦各种植区冬小麦播期及典型品种的遗传参数

Table 2 Sowing dates and model parameters for representative winter wheat varieties in each planting district in Southwest China

分区 District	站点 Station	冬小麦品种 Winter wheat variety	春化敏感性 Vernalization sensitivity	光周期敏感性 Photoperiod sensitivity	灌浆至成熟所需有效积温 Effective accumulative temperature required from grain-filling to maturity (℃·d)	每克茎秆干物质籽粒数 Grains for unit dry matter of stem ($\text{number}\cdot g^{-1}$)	参数调试年份 Year for calibration	验证年份 Year for validation	播期(月-日) Sowing date (month-day)	生长天数 Length of growing period (d)
I	陆良 Luliang	福利 Fuli	3.0	3.3	520	18.0	1987	1988	10-10	190
II	丽江 Lijiang	夏繁 Xiafan	3.2	3.5	730	25.0	2007—2008	2009	10-25	195
III	万州* Wanzhou	81-8	1.5	2.0	420	26.0	2002—2003	2004	11-05	190
IV	合川* Hechuan	绵阳 26 Mianyang26	2.7	3.0	590	28.0	2001—2002	2003—2005	11-15	185
V	路西 Luxi	白壳 82 Baike82	1.9	2.0	800	18.0	1992—1993	1995	10-25	170

该站点小麦品种遗传参数来自文献[23]。参数调试与验证年份均为小麦收获年。 means that model parameters for winter wheat quoted from the reference [23]. Both years for calibration and validation are the harvest years of winter wheat.

表 3 APSIM 模型对小麦生育期、生物量和产量模拟结果的验证

Table 3 Validation results of APSIM model simulated development stages, above-ground biomass and yield of winter wheat

品种 Variety	生育期 RMSE RMSE for growth duration (d)			NRMSE (%)	
	播种–出苗 Sowing to emergence	播种–开花 Sowing to flowering	播种–成熟 Sowing to maturity	地上部分生物量 Above-ground biomass	产量 Yield
福利 Fuli	0.0	5.0	5.0	25.0	20.8
夏繁 Xiafan	1.0	4.0	2.0	13.0	5.3
81-8*	1.0	3.0	0.0	6.8	16.8
绵阳 26* Mianyang26	0.8	0.8	3.2	17.1	20.3
白壳 82 Baike82	1.0	7.0	4.0	15.7	11.9

表示该品种的验证结果来自文献[23]。 means that the validation result of the winter wheat variety quoted from the reference [23].

表 4 1961—2010 年西南各种植区冬小麦生长季总辐射、≥0 ℃有效积温、气温日较差和总降水的气候倾向率均值

Table 4 Means of climate tendency of solar radiation, ≥ 0 ℃ accumulated temperature, diurnal temperature range and precipitation during winter wheat growing season in each planting district in Southwest China from 1961 to 2010

分区 District	总辐射倾向率 Tendency rate of solar radiation ($MJ\cdot m^{-1}\cdot 10a^{-1}$)	≥0 ℃积温倾向率 Tendency rate of ≥0 ℃ accumulated temperature (℃$\cdot d\cdot 10a^{-1}$)	气温日较差倾向率 Tendency rate of diurnal temperature range (℃$\cdot 10a^{-1}$)	总降水倾向率 Tendency rate of precipitation ($mm\cdot 10a^{-1}$)
I	–5.3	48.1	–0.24	–10.8
II	–20.9	56.7	–0.13	1.8
III	–28.6	27.3	–0.08	–5.8
IV	–18.3	31.1	–0.15	–8.4
V	5.7	42.9	–0.15	–5.9

空间上呈西低东高分布势态；近 50 年 61%的站点雨养产量呈下降趋势，其中 41%的站点显著减产($P<0.05$)，种植区东北部最明显，全区产量平均变化速率–31 $kg\cdot hm^{-2}\cdot 10a^{-1}$(图 3)，相比于潜在产量，冬小麦雨养产量减产幅度较小。

冬小麦潜在产量变化在 45 个站点显著，平均减产 723 $kg\cdot hm^{-2}\cdot 10a^{-1}$。1961—2010 年生育期日均辐射减少 0.63 $MJ\cdot m^{-2}$，平均温度增加 1.22 ℃，平均气温日较差降低 0.70 ℃，造成的减产量分别占 45%、36%和 2%。整体上辐射减少对冬小麦潜在产量降低的贡献率最高，温度次之，气温日较差最小。基于标准化回归分析结果表明，辐射、温度及气温日较差等因子影响显著的站点分别占 45 个站点的 98%、82%和 11%，其中辐射降低、温度升高对产量的影响均为负效应，气温日较差降低对产量的显著影响在盘县、贡山为负效应，而在温江、黔西和湄潭表现为正效应(表 6)。

冬小麦雨养产量变化在 18 个站点显著，平均减产 529 $kg\cdot hm^{-2}\cdot 10a^{-1}$。1961—2010 年生育期日均辐射减少 0.47 $MJ\cdot m^{-2}$，平均温度增加 1.11 ℃，总降水

a
总辐射倾向率
Change trend of solar radiation (MJ·m⁻¹·10a⁻¹)
–64~–40
–40~–30
–30~–20
–20~–10
–10~0
0~10
10~20
20~48

b
N
≥0 ℃积温倾向率
Change trend of ≥0 ℃ accumulated temperature (℃·d·10a⁻¹)
–102~–10
–10~0
0~20
20~40
40~60
60~80
80~100
100~194

c
气温日较差倾向率
Change trend of diurnal temperature range (℃·10a⁻¹)
–0.73~–0.4
–0.4~–0.3
–0.3~–0.2
–0.2~–0.1
–0.1~0
0~0.05
0.05~0.1
0.1~0.2
0 175 350 700 1 050 km

d
总降水倾向率
Change trend of precipitation (mm·10a⁻¹)
–20~–12
–12~–9
–9~–6
–6~–3
–3~0
0~3
3~6
6~29
▲ Significant $P<0.05$
• Non-significant

图 2　西南地区 1961—2010 年冬小麦生长季总辐射(a)、≥0 ℃有效积温(b)、气温日较差(c)和总降水(d)的气候倾向率空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of climate tendency of solar radiation (a), ≥ 0 ℃ accumulated temperature (b), diurnal temperature range (c) and precipitation (d) during winter wheat growing season in each planting district in Southwest China from 1961 to 2010

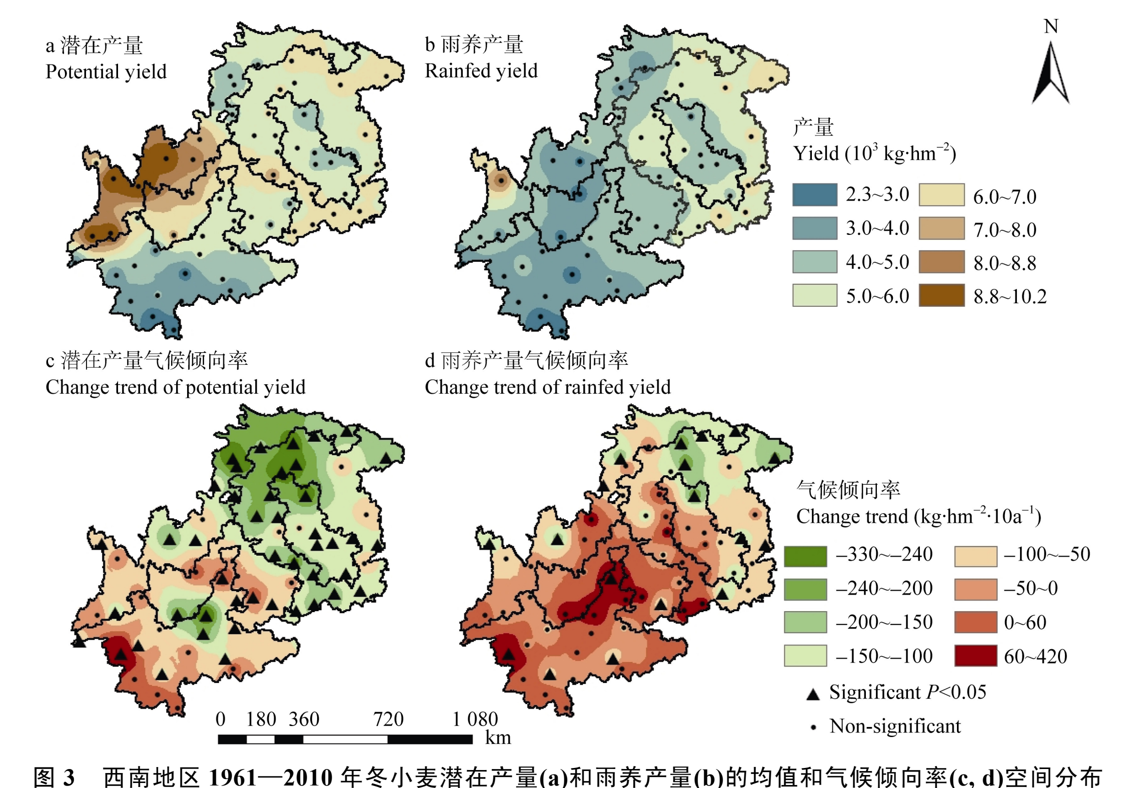


图 3　西南地区 1961—2010 年冬小麦潜在产量(a)和雨养产量(b)的均值和气候倾向率(c, d)空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of simulated potential yields (a) and rainfed yields (b) and their climate tendency rates (c, d) of winter wheat in Southwest China from 1961 to 2010

表 5 1961—2010 年西南各种植区模拟的冬小麦潜在和雨养产量及变化趋势

Table 5 Simulated potential and rainfed yields of winter wheat and their change rates in each planting district in Southwest China from 1961 to 2010

分区 District	潜在产量 Potential yield (kg·hm^{-2})	潜在产量变化趋势 Change rate of potential yield (kg·hm^{-2}·10a^{-1})	雨养产量 Rainfed yield (kg·hm^{-2})	雨养产量变化趋势 Change rate of rainfed yield (kg·hm^{-2}·10a^{-1})
I	5 848	–43	3 710	15
II	7 241	–136	4 632	–55
III	6 371	–169	5 700	–56
IV	4 729	–137	4 466	–88
V	4 081	–35	3 670	26

表 6 西南地区不同站点冬小麦生长季气象因子对潜在产量的影响程度及贡献率

Table 6 Influence degrees and contribution rates of growing season climate factors on simulated potential yield of winter wheat in different sites in Southwest China

分区 District	站点 Station	标准化回归系数 Standardize regression coefficient			贡献率 Contribution rate (%)		
		辐射 Radiation	温度 Temperature	气温日较差 Diurnal temperature range	辐射 Radiation	温度 Temperature	气温日较差 Diurnal temperature range
I	盘县 Panxian+	0.986**	–0.456**	–0.322**	66	–15	43
	楚雄 Chuxiong	0.903**	–0.086	–0.154	97	—	—
	兴义 Xingyi	0.795**	–0.350**	–0.067	77	45	—
II	温江 Wenjiang	0.649**	–0.154	0.251*	63	—	16
	都江堰 Dujiangyan	0.839**	–0.103	–0.026	74	—	—
	绵阳 Mianyang	0.729**	–0.079	0.037	68	—	—
	雅安 Ya'an	0.707**	–0.149	0.108	49	—	—
	乐山 Leshan	0.937**	–0.249**	–0.104	67	22	—
	木里 Muli	0.396**	–0.486**	–0.137	34	69	—
	贡山 Gongshan	0.919**	0.002	–0.411*	46	—	5
	西昌 Xichang	0.378**	–0.512**	0.087	52	79	—
	保山 Baoshan	0.375**	–0.471**	0.214	–23	113	—
	万源 Wanyuan	0.778**	–0.147	–0.007	59	—	—
III	宜宾 Yibin	0.841**	–0.443**	0.127	61	23	—
	巴中 Bazhong	0.842**	–0.383**	0.074	53	17	—
	奉节 Fengjie	0.640**	–0.431**	–0.019	42	54	—
	遂宁 Suining	0.851**	–0.376**	0.025	66	17	—
	南充 Nanchong	0.930**	–0.391**	0.019	68	13	—
	内江县 Neijiang	0.903**	–0.476**	–0.046	65	19	—
	纳溪 Naxi	0.856**	–0.502**	–0.027	71	44	—
	毕节 Bijie	0.801**	–0.138	0.235	50	—	—
	铜仁 Tongren	0.663**	–0.371**	0.101	27	60	—
	黔西 Qianxi	0.749**	–0.720**	0.540**	28	41	8
	贵阳 Guiyang	0.813**	–0.273**	0.272	84	–2	—
	望谟 Wangmo	0.801**	–0.598**	–0.229	21	90	—
	罗甸 Luodian	0.745**	–0.493**	0.183	56	40	—
	独山 Dushan	0.773**	–0.286**	0.233	67	25	—
	榕江 Rongjiang	0.701**	–0.399**	0.151	60	46	—
IV	沙坪坝 Shapingba	0.807**	–0.592**	–0.029	59	26	—
	桐梓 Tongzi	0.906**	–0.349**	0.183	33	44	—
	遵义 Zunyi	0.608**	–0.276*	0.073	42	56	—
	湄潭 Meitan	0.275	–0.323**	0.763**	—	39	24
	思南 Sinan	0.707**	–0.483**	0.277	26	52	—
	凯里 Kaili	0.731**	–0.354**	0.077	30	39	—
V	会泽 Huize+	0.948**	–0.612**	–0.139	155	–123	—
	昆明 Kunming	0.663**	–0.508**	0.168	49	49	—
	沾益 Zhanyi	0.902**	–0.517**	–0.163	49	43	—
	瑞丽 Ruili	0.752**	–0.777**	–0.025	–17	160	—
	玉溪 Yuxi	0.777**	–0.401**	0.014	48	42	—
	泸西 Luxi	0.936**	–0.466**	–0.011	44	45	—
	耿马 Gengma+	0.450**	–0.727**	0	36	57	—
	临沧 Lincang	0.692**	–0.842**	0	–23	138	—
	思茅 Simao	0.673**	–0.670**	0.013	–5	127	—
	蒙自 Mengzi	0.816**	–0.891**	–0.138	26	72	—

表示显著性水平 $P<0.01$, *表示显著性水平 $P<0.05$, +表示该站产量显著增加。下同。 stands for significance at 0.01 level, * stands for significance at 0.05 level, + means the yield in the site increased significantly. The same below.

减少 49 mm，造成的减产量分别占 36%、39%和 7%，而平均气温日较差降低 0.26 ℃，表现为对产量有 8%的正贡献率。与潜在产量不同的是，整体上温度升高对冬小麦雨养产量降低的贡献率最高，辐射和降水次之，气温日较差最小。基于标准化回归分析结果表明，辐射、温度、气温日较差及降水因子分别在 83%、67%、39%和 17%的站点中影响显著，其中辐射和降水减少、温度升高对产量的影响均为负效应，气温日较差降低对产量的影响均呈正效应(表 7)。

表 7　西南地区不同站点冬小麦生长季气象因子对雨养产量的影响程度及贡献率

Table 7　Influence degrees and contribution rates of growing season climate factors on simulated rainfed yields of winter wheat in different sites in Southwest China

分区 District	站点 Station	标准化回归系数 Standardize regression coefficient				贡献率 Contribution rate (%)			
		辐射 Radiation	温度 Temperature	气温日较差 Diurnal temperature range	降水 Precipitation	辐射 Radiation	温度 Temperature	气温日较差 Diurnal temperature range	降水 Precipitation
I	兴义 Xingyi	0.742**	–0.364**	–0.402**	0.227	69	44	–21	—
II	都江堰 Dujiangyan	0.540**	–0.380**	–0.253	0.126	53	29	—	—
	雅安 Ya'an	0.664**	–0.309	–0.094	0.074	50	39	—	—
	木里 Muli	0.183	–0.083	0.060	0.688**	—	—	—	55
	贡山 Gongshan	0.787**	–0.147	–0.544	–0.176	34	—	6	—
	万源 Wanyuan	0.768**	–0.141	–0.037	0.058	60	—	—	—
III	阆中 Langzhong	0.195	–0.287*	–0.307*	0.357**	—	26	39	8
	巴中 Bazhong	0.703**	–0.222	–0.356*	0.165	60	—	–4	—
	奉节 Fengjie	0.613**	–0.429**	–0.081	–0.101	38	51	—	—
	南充 Nanchong	0.469**	–0.108	–0.783**	0.205	57	—	22	—
	铜仁 Tongren	0.663**	–0.371**	0.526	–0.013	27	60	—	—
	独山 Dushan	0.777**	–0.326**	0.210	–0.090	67	30	—	—
IV	沙坪坝 Shapingba	0.727**	–0.624**	–0.203	0.005	57	30	—	—
	思南 Sinan	0.697**	–0.486**	0.249	–0.038	26	53	—	—
V	会泽 Huize+	0.149	–0.030	–0.542**	0.243*	—	—	66	9
	耿马 Gengma+	0.326**	–0.787**	–0.112	0.061	28	66	—	—
	思茅 Simao	0.673**	–0.792**	–0.449**	–0.145	–7	216	–84	—
	蒙自 Mengzi	0.489**	–0.749**	–0.136	–0.050	21	83	—	—

气象产量变化率和模拟雨养产量距平变化率的对比分析表明：整体上，模型模拟的雨养产量距平变化率和观测的气象产量变化率相似，气象产量较差年份模拟的雨养产量距平偏低，气象产量较好年份的雨养产量距平偏高，且气象产量与雨养产量距平的大、小极值发生年份基本一致。以上结果显示模型可较准确地反映小麦生长季气象要素变化对产量的影响(表 8)。

3　讨论与结论

在我国模型适应性评价研究中，通常认为产量和生物量模拟值与实测值的 NRMSE 低于 30%，模拟效果可以接受。如王琳等[25]对山东禹城冬小麦–夏玉米生物量模拟结果的 NRMSE 为 24%~28%，刘园[26]对河北栾城和河南郑州冬小麦生物量模拟结果的 NRMSE 分别为 10%和 37%。因此，相比于前人研究结果，本研究结果表明 APSIM 模型在西南地区也具有较好的适应性。综合前人研究进展，小麦品种遗传参数取值为春化敏感性参数在 1.5~2.9，光周期敏感性参数在 2.0~3.9，灌浆至成熟所需有效积温在 420~600 ℃·d，单位茎秆干物质籽粒数在 23.0~33.0[4–5,10,27–28]。本研究确定的冬小麦上述 4 个作物遗传参数为 1.5~3.0、2.0~3.5、420~800 ℃·d 和 18.0~28.0，均在合理范围内，且与华北平原相比，冬小麦更偏于春性。

本研究表明，1961—2010 年中西南地区冬小麦生长季气象要素变化趋势与我国华北平原、长江中下游、西北等冬小麦主产区基本一致，整个生长季均呈辐射降低、温度增加以及降水减少的趋势[6–7,29–30]，但西南地区变化幅度最小。西南冬小麦生长季气象要素变化空间分布与春玉米相似，总辐射降低区集中在南部中区和东部，降温区集中于西部，气温日较差减小区主要位于南部和东南部；但由于水热资源的季节性差异，冬小麦生长季增温幅度较大，且

表 8　典型站点冬小麦实际气象产量变化率与模拟雨养产量距平变化率的对比

Table 8　Comparison of the variation rate of meteorological yield and simulated rainfed yield anomaly of winter wheat at the typical stations

站点 Station	产量较差年份 Low yield year			产量正常年份 Normal yield year			产量较好年份 High yield year		
	年份 Year	气象产量变化率 Variation rate of meteorological yield (%)	雨养产量距平变化率 Variation rate of rainfed yield anomaly (%)	年份 Year	气象产量变化率 Variation rate of meteorological yield (%)	雨养产量距平变化率 Variation rate of rainfed yield anomaly (%)	年份 Year	气象产量变化率 Variation rate of meteorological yield (%)	雨养产量距平变化率 Variation rate of rainfed yield anomaly (%)
酉阳 Youyang	1987	−32.0	−16.2	1985	1.9	4.7	1984	15.6	1.1
	1988	−17.1	−7.8	1986	0.3	2.3	1991	35.0	10.1
	1994	−25.4	−4.7	1989	−8.8	−3.1	1992	17.2	5.1
	2001	−54.7	−16.1	1990	−8.8	−8.2	1993	16.3	6.0
	2002	−38.5	−11.8	1995	4.9	−0.9	1996	42.3	11.0
	2003	−11.2	−5.4	2008	0	0.6	1998	28.3	1.4
	2009	−45.8	−11.4	—	—	—	1999	55.1	9.5
	—	—	—	—	—	—	2000	54.6	9.8
	—	—	—	—	—	—	2004	47.4	11.5
	—	—	—	—	—	—	2005	34.9	5.7
	—	—	—	—	—	—	2006	64.2	10.8
	—	—	—	—	—	—	2007	18.3	9.6
玉溪 Yuxi	1981	−21.2	−10.9	1988	−8.2	−2.9	1982	10.9	10.2
	1984	−10.2	−12.2	1989	−6.9	−2.8	1983	53.9	23.0
	1985	−64.6	−31.3	1991	3.1	−1.3	1987	17.7	10.5
	1990	−12.1	−1.8	1996	−1.3	0.6	1994	36.0	20.3
	1992	−13.1	−2.6	1997	−2.8	−3.5	1998	10.4	7.4
	1993	−12.5	−4.7	2000	7.0	7.1	2005	36.5	11.9
	1995	−12.1	−4.6	2001	2.4	1.4	2006	17.9	9.4
	1999	−12.6	−4.1	2002	−9.7	−3.6	2007	11.6	9.0
	—	—	—	2003	0.2	10.6	2008	13.7	1.1
	—	—	—	2004	2.1	−2.4	2009	38.4	8.6
巴中 Bazhong	1981	−18.8	−8.0	1982	3.2	3.4	1983	21.8	10.5
	1988	−52.6	−11.6	1984	−0.6	1.9	1985	26.1	5.9
	1989	−12.9	−4.8	1992	−9.6	−9.3	1986	14.8	6.4
	1990	−34.5	−8.1	2008	7.3	6.1	1987	25.1	9.9
	1991	−19.4	−7.7	—	—	—	1994	44.9	10.9
	1993	−18.3	−1.3	—	—	—	1997	21.9	5.0
	1995	10.7	−7.8	—	—	—	1998	30.4	5.4
	1996	−26.6	−5.5	—	—	—	2000	20.7	5.3
	1999	−11.5	1.0	—	—	—	2001	18.8	6.2
	2002	−30.4	−7.7	—	—	—	2006	60.5	10.4
	2003	−20.8	−5.3	—	—	—	2010	5.3	4.9
	2004	−29.6	−6.4	—	—	—	—	—	—
	2005	−21.2	−6.9	—	—	—	—	—	—
	2009	−13.7	−4.4	—	—	—	—	—	—

降水减少区集中于南部和东南部，而春玉米生长季降水减少区只分布于中部少数站点[31−34]。

就整个小麦生育期而言，总辐射降低会使作物净光合速率和灌浆速率下降，导致同化物积累降低，因此西南地区生长季辐射的下降导致小麦产量显著下降；温度的升高会缩短作物生育期，减少干物质积累时间，导致产量下降；西南冬小麦生长季的 10 月至翌年 5 月期间降水较少，降水减少会造成一定的水分胁迫，限制产量；夜间温度增加导致呼吸作用增强，不利于同化物累积，但平均温度上升且未

超过最适温度之前对作物的光合作用有利，因此在不同站点，这两种效应的交互作用导致气温日较差降低对产量影响效应不同。我国华北[7,10,29]、西北[35]以及黄淮海地区[36−37]的研究结果也表明，近几十年来总体上冬小麦生长季辐射和降水对产量呈正效应，温度对产量为负效应，其中冬小麦生长季辐射降低及温度增加是模拟产量下降的主要因素，与本文研究结论一致。西南地区气候变化存在显著的空间差异，尽管全区大部分地区小麦生长季辐射呈减少趋势，但部分站点生长季辐射增加，导致冬小麦潜在产量和雨养产量也呈增加趋势，分别占全区站点的14%和 39%。

本研究结果表明，模拟的冬小麦潜在产量和雨养产量均呈降低趋势，说明气候变化对冬小麦产量整体呈负影响，与我国华北[5,8,26,28,38]及西北[35]等地的研究结论相同。而相关研究表明，品种改良以及改善水肥施用等农田管理措施，可减轻或抵消气候变化的负面影响，降低作物产量风险[6,9,29,39]。针对西南地区，为应对温度升高和降水减少趋势，在今后的生产中可采取选用新的高产和抗高温品种、在不影响下茬作物播种前提下采用生育期更长的品种、适当推迟冬小麦播期、优化冬小麦灌溉制度等措施。

APSIM 模型在反映大田作物生长实际状况方面仍然存在一定的不确定性。首先表现在模型参数确定方面，西南地区气候、地形及土壤类型等下垫面情况复杂，本研究虽然划分了不同的冬小麦种植区和主要土壤类型，考虑了不同的农业气候特征和作物实际生长情况，但仍缺乏对地形坡度、水分径流等环境参数的修正；其次，模型缺乏模拟病虫草害和气象灾害对作物生长过程影响的功能，会在模型验证和应用过程中引入潜在偏差[40]；再次，作物生育期和产量观测资料一方面具有不准确性，另一方面不同地区多年实测数据序列间可能不独立，会导致基于一元线性回归模型的模拟值与实测值对比的结果存在误差[41]。因此在后续的研究中，应加强模型误差原因分析并对模型进一步改进。

此外，本文仅基于单一模型分析了气候变化对西南冬小麦的影响，已有研究表明，尽管个别作物生长模型在一定范围内能够很好地模拟作物生长发育和产量形成，但在评估未来气候变化对小麦生产的影响时，由于模型结构和参数化过程的差异，单一模型的评估结果存在一定的不确定性，基于多模型集成可降低气候变化影响评估结果的不确定性[42]。因此，将来可通过集成多个作物生长模型来评估未来气候变化对西南冬小麦生产的影响。

参考文献 References

[1] 中华人民共和国农业部. 新中国农业 60 年统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Statistical Data of Agriculture of the New China in 60 Years[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009

[2] Fang S B, Cammarano D, Zhou G S, et al. Effects of increased day and night temperature with supplemental infrared heating on winter wheat growth in North China[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 64: 67–77

[3] Fang S B, Tan K Y, Ren S X, et al. Fields experiments in North China show no decrease in winter wheat yields with night temperature increased by 2.0–2.5 ℃[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(6): 1021–1027

[4] 史印山, 王玉珍, 池俊成, 等. 河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1444–1447
Shi Y S, Wang Y Z, Chi J C, et al. Impact of climate change on winter wheat production in the Hebei Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1444–1447

[5] 沈禹颖, 南志标, Bellotti B, 等. APSIM 模型的发展与应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1027–1032
Shen Y Y, Nan Z B, Bellotti B, et al. Development of APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) and its application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8): 1027–1032

[6] Wang J, Wang E L, Yang X G, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. Climatic Change, 2012, 113(3/4): 825–840

[7] Wang J, Wang E L, Feng L P, et al. Phenological trends of winter wheat in response to varietal and temperature changes in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 135–144

[8] Chen C, Baethgen W E, Robertson A. Contributions of individual variation in temperature, solar radiation and precipitation to crop yield in the North China Plain, 1961–2003[J]. Climatic Change, 2013, 116(3/4): 767–788

[9] Chen C, Wang E L, Yu Q, et al. Quantifying the effects of climate trends in the past 43 years (1961–2003) on crop growth and water demand in the North China Plain[J]. Climatic Change, 2010, 100(3/4): 559–578

[10] 李艳, 薛昌颖, 杨晓光, 等. 基于 APSIM 模型的灌溉降低冬小麦产量风险研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 35–44
Li Y, Xue C Y, Yang X G, et al. Reduction of yield risk of winter wheat by appropriate irrigation based on APSIM model[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 35–44

[11] 李克南, 杨晓光, 刘园, 等. 华北地区冬小麦产量潜力分布特征及其影响因素[J]. 作物学报, 2012, 38(8): 1483–1493
Li K N, Yang X G, Liu Y, et al. Distribution characteristics of winter wheat yield and its influenced factors in North

China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(8): 1483–1493

[12] 李广, 李玥, 黄高宝, 等. 不同耕作措施旱地小麦生产应对气候变化的效应分析[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 160–168
Li G, Li Y, Huang G B, et al. The effects of climate change on dryland wheat production under different tillage systems[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(5): 160–168

[13] 周少平. 基于APSIM模型的黄土高原玉米–小麦–大豆轮作系统产量、土壤水分动态[D]. 兰州: 兰州大学, 2008
Zhou S P. Simulated crop yield and soil water within a maize-winter wheat-soybean rotation in the Loess Plateau by APSIM[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008

[14] 庞艳梅, 陈超, 潘学标, 等. 未来气候情景下四川盆地冬小麦生育期气候资源及生产潜力的变化[J]. 中国农业气象, 2014, 35(1): 1–9
Pang Y M, Chen C, Pan X B, et al. Change of climatic resources and potential productivity during the entire growth period of winter wheat under future climate scenario in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(1): 1–9

[15] 张建平, 李永华, 高阳华, 等. 未来气候变化对重庆地区冬小麦产量的影响[J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 268–270
Zhang J P, Li Y H, Gao Y H, et al. Impacts of future climate change on yields of winter wheat in Chongqing[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(3): 268–270

[16] 代姝玮, 杨晓光, 赵孟, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅱ. 西南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442–452
Dai S W, Yang X G, Zhao M, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change Ⅱ. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 442–452

[17] 赵汝植. 西南区自然区划探讨[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1997, 22(2): 193–198
Zhao R Z. A study of the physico-geographical regionalization in Southwest region[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science, 1997, 22(2): 193–198

[18] 马同生. 中国土种志(第 6 卷)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996
Ma T S. National Soil Survey (The 6th volume)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996

[19] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 267–288

[20] Wang E, Robertson M J, Hammer G L, et al. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 18(1/2): 121–140

[21] Ångström A. Solar and terrestrial radiation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1924, 50: 121–126

[22] Prescott J A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation[J]. Transactions of the Royal Society of South Australia, 1940, 64: 114–118

[23] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. APSIM 模型在西南地区的适应性评价——以重庆冬小麦为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1237–1243
Dai T, Wang J, He D, et al. Adaptability of APSIM model in Southwestern China: A case study of winter wheat in Chongqing City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 1237–1243

[24] 卢纹岱. SPSS 统计分析[M]. 第 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2010
Lu W D. Statistics and Analysis in SPSS[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010

[25] 王琳, 郑有飞, 于强, 等. APSIM 模型对华北平原小麦–玉米连作系统的适用性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2480–2486
Wang L, Zheng Y F, Yu Q, et al. Applicability of Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) in simulating the production and water use of wheat-maize continuous cropping system in North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2480–2486

[26] 刘园. 气候因子和栽培管理对华北冬小麦–夏玉米生产体系的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2010
Liu Y. Contributions of climatic factors and agronomical managements on crop production of winter wheat and summer maize in the North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2010

[27] 李广, 黄高宝, Bellotti W, 等. APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2655–2663
Li G, Huang G B, Bellotti W, et al. Adaptation research of APSIM model under different tillage systems in the Loess hill-gullied region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2655–2663

[28] 张祎. 未来气候变化对黄淮海平原冬小麦生产影响及适应措施分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2012
Zhang Y. The impacts of climate change on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) production and its adaptation strategies in the Huang-Huai-Hai Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012

[29] Wang J, Wang E L, Yin H, et al. Declining yield potential and shrinking yield gaps of maize in the North China Plain[J]. Agricultural and forest Meteorology, 2014, 195/196: 89–101

[30] 胡洵瑀, 王靖, 冯利平. 华北平原冬小麦各生育阶段农业气候要素变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2013, 34(3): 317–323
Hu X Y, Wang J, Feng L P. Analysis on agro-climatic elements variation during winter wheat growing season in North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(3): 317–323

[31] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. 基于 APSIM 模型的气候变化对西南春玉米产量影响研究[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 155–165
Dai T, Wang J, He D, et al. Modelling the impacts of climate change on spring maize yields in Southwest China with APSIM Model[J]. Resources Science, 2016, 38(1): 155–165

[32] He D, Wang J, Dai T, et al. Impact of climate change on maize potential productivity and the potential productivity gap in

Southwest China[J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(6): 1155–1167

[33] 庞艳梅, 陈超, 潘学标, 等. 未来气候变化对四川盆地玉米生育期气候资源及生产潜力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1526–1536
Pang Y M, Chen C, Pan X B, et al. Impact of future climate change on climatic resources and potential productivity of maize in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(12): 1526–1536

[34] 齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等. 西南区域气候变化原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 35–42
Qi D M, Zhou C Y, Li Y Q, et al. Cause analysis of climate changes in Southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2012, 32(1): 35–42

[35] 郝祺. 气候变化对西北地区小麦生产影响的模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009
Hao Q. Simulation of the impacts of climate change on wheat production in the Northwest region[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009

[36] Liu S X, Mo X G, Lin Z H, et al. Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1195–1209

[37] 田展, 刘纪远, 曹明奎. 气候变化对中国黄淮海农业区小麦生产影响模拟研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 598–607
Tian Z, Liu J Y, Cao M K. Simulation of the impact of climate change on Chinese wheat production in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(4): 598–607

[38] Zhang X Y, Wang S F, Sun H Y, et al. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 50: 52–59

[39] 徐建文, 梅旭荣, 居辉, 等. 黄淮海地区冬小麦关键生育期不同灌溉水平对产量影响的模拟[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1485–1492
Xu J W, Mei X R, Ju H, et al. Simulation of winter wheat yield in response to irrigation level at critical growing stages in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 1485–1492

[40] Weiss A, Wilhelm W W. The circuitous path to the comparison of simulated values from crop models with field observations[J]. The Journal of Agricultural Science, 2006, 144(6): 475–488

[41] White J W, Boote K J, Hoogenboom G, et al. Regression-based evaluation of ecophysiological models[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(2): 419–427

[42] Asseng S, Ewert F, Rosenzweig C, et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9): 827–832